

# 터널 콘크리트 구조물 균열에 에폭시 주입의 표준화에 대한 기초적 연구

## A basic study on the standardization of epoxy injection in cracks of tunnel concrete structures

백종명\*                      장석재\*\*  
Baek, Jong-Myeong        Jang, Seog-Jae

### ABSTRACT

In this status no inspection standard of quality in repair of present concrete structure has a problem to repair for simple experience. In this paper for this problem improvement, it made an analysis of relation to injection quantity of crack width, injection time of crack width, injection pressure of crack width, injection pressure and time, injection quantity of structural size, injection quantity of structural individual crack position, injection time about crack width and structural thickness. The data gained in analysis result be judged that it will help in systematic quality control about concrete structural repair.

### 1. 서 론

콘크리트 구조물의 사용에 따른 균열의 발생 및 노후화가 날로 증가하는 추세에 있어, 이에 따라 유지보수 차원에 막대한 예산이 투입되고 있으나 보수에 대한 품질상태를 검사할 수 있는 기준 설정이 없는 상태로 단순한 경험에 의존하여 보수하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 구조물 균열에 대한 에폭시 수지 주입의 보수에 대한 실측자료를 이용하여 균열폭에 대한 주입량, 균열폭에 대한 주입시간, 균열폭에 대한 주입압력, 주입압력과 주입시간, 구조물 규모에 따른 주입량, 구조물별 균열 위치에 따른 주입량, 균열폭 및 구조물 두께와 주입시간의 관계를 검토함으로써 에폭시 수지 주입의 주입압력, 주입시간, 주입량 등에 대한 체계적인 품질관리를 기대할 수 있을 것이다. 본 연구를 통해서 에폭시 수지 주입의 구조물 보수공사와 관련하여 보수사업비 및 하자보수공사에 적용하기 위한 균열 및 누수 보수공사에 대한 기초적인 표준화 방안을 작성하여, 원활한 시공관리와 철저한 품질관리가 가능토록하며, 이를 통해 결과적으로 구조물의 내구성 증진 및 지하철, 철도 등 운행선 구간의 안전을 도모하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

### 2. 현장 조사

#### 2.1 균열폭에 따른 주입시간, 주입압력, 주입량 조사

주입 시공한 대상 구조물은 지하철 3호선(○○~○○, ○○~○○), 지하철 4호선(○○~○○)

\* 책임저자 : 서울지하철공사, 과장, 정회원

\*\* 한국철도기술공사, 과장, 정회원

구간으로 구조물 형태는 박스 구조물과 터널 라이닝 구조물이며, 이 대상 구조물에서 조사된 균열 폭에 따른 주입시간, 주입압력, 주입량은 다음 도표 1의 내용과 같다.

도표 1. 균열폭에 따른 주입시간, 주입압력, 주입량 비교

균열폭 (mm)	주입압력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	주입시간		주입량		비고
		(min.sec/m)	(min.sec/ea)	(kg/m)	(kg/ea)	
0.3	5.08	6.10	1.14	0.154	0.0308	ea(개소)는 20 cm간격 주입시를 말함
0.5	3.11	8.55	1.47	0.268	0.0536	
0.7	5.08	6.10	1.14	0.318	0.0636	

그림 1과 그림 2는 에폭시 주입 단면과 에폭시 주입 후 주입효과에 대한 유효성 확인으로 코아 채취에 위한 주입 상태 검사를 보여주고 있다.

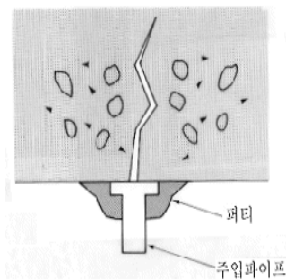


그림 1. 주입 단면도



그림 2. 코아채취에 의한 유효성확인

## 2.2 콘크리트 균열 깊이의 조사

박스 구조물(두께 40~80 cm)과 터널 라이닝 구조물(두께 20 cm) 구간의 사전 균열깊이 측정

도표 2. 균열깊이 및 균열길이 측정결과

균열폭 (mm)	박스구간		터널라이닝구간		비고
	균열깊이(mm)	균열길이(m)	균열깊이(mm)	균열길이(m)	
0.3	59	4.2	85	2.0	
	90	3.5	관통	2.0	
	68	3.0	113	2.5	
	22	4.0	75	4.5	
	∴	∴	∴	∴	
0.5	85	5.5	159	3.0	
	165	5.0	96	0.53	
	315	1.5	84	3.0	
	관통	3.0	120	2.5	
	∴	∴	∴	∴	
0.7	106	3.0	120	3.5	
	100	4.0	66	2.0	
	99	3.5	59	2.5	
	155	3.5	135	2.8	
	∴	∴	∴	∴	

은 외관조사를 기본으로 하며, 초음파를 이용한 Tc-To법을 적용하여 측정하였고, 측정에 따른 결과는 상기 도표 2와 같이 박스구간의 경우에는 22~315 mm의 균열깊이를 나타냈으며, 터널 라이닝 구간에는 75~159 mm의 균열깊이를 나타냈고, 박스 및 터널 라이닝 구조물 일부에는 관통균열도 발생하였다. 조사된 균열은 비구조적인 균열로 대부분의 균열패턴이 양 측벽 하단으로부터 발전되어 있는 점을 고려해 볼 때 시공중의 수화열과 구속, 건조수축, 온도변화, 시공이음, 신축이음, 콜드 조인트의 시공불량, 주변 구조물과의 구속관계에 의한 원인으로 추정된다.

### 3. 자료의 분석

#### 3.1 균열폭에 대한 주입량의 관계

균열폭에 의한 주입량은 균열폭이 커지면서 주입량은 증가하고 있으며, 이때 실측치로부터의 추세 곡선식은  $Q=0.40916+0.0403$  (그림 3. 관련)으로 나타낼 수 있다. 주입량 곡선식을 이용하여 계산한 균열폭에 대한 주입량은 도표 3과 같다.

도표 3. 균열폭에 대한 주입량

균열폭 (mm)	주입량 계산치		주입량 실측치		비고
	kg/m	kg/ea	kg/m	kg/ea	
0.1	0.0812	0.0162	-	-	
0.2	0.1221	0.0244	-	-	
0.3	0.1630	0.0326	0.1540	0.0308	
0.4	0.2039	0.0407	-	-	
0.5	0.2448	0.0489	0.2680	0.0536	
0.6	0.2857	0.0571	-	-	
0.7	0.3266	0.0653	0.3180	0.0636	
0.8	0.3675	0.0735	-	-	
0.9	0.4084	0.0816	-	-	
1.0	0.4494	0.0898	-	-	

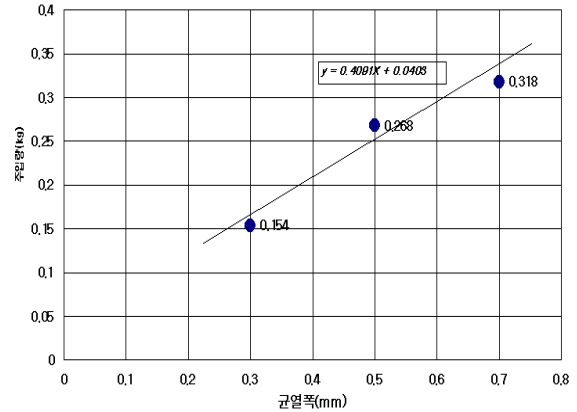


그림 3. 균열폭과 주입량의 관계

개소 당 주입량은 추세 곡선식을 이용한 계산치와 실측치를 비교한 결과이며, 균열폭 0.3 mm와 0.7 mm에서 개소 당 주입량은 실측치가 계산치에 비해 작게 나타났으며, 이 원인은 주입압과 주입 시간의 차로 인한 것으로 생각된다. 또한 균열 폭 0.5 mm에서의 개소 당 주입량은 실측치가 계산치에 비해 크게 나타났다. 그 이유는 저압 및 저속 주입에서 주입시간이 길어지면서 나타나는 현상으로 주입관리에 가능한 주입압을 낮게 하고 주입시간을 충분하게 줘 주입함으로서, 주입관리에 대한 품질관리를 할 수 있음을 나타냈다.

#### 3.2 균열폭, 주입량과 주입압력의 관계식

1995년 W. J. Baker에 의하면 1개의 개수폭에 있어서 주입압력과 주입량의 관계는 다음과 같다.

$$P_0 - P = \frac{6\nu Q \ln R}{\pi \delta^3 r_0} + \frac{3 \times W \times Q^2}{20 \times \pi \times g \times \delta^3} \left( \frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{R^2} \right) \quad (1)$$

위 (1)식을 간략히 하면 다음과 같다.

$$P = \frac{6\nu Q \ln R}{\pi \delta^3 r_0} \quad (2)$$

여기서,  $P$  : 주입압력 ( $kgf/cm^2$ )

$\nu$  : 뉴턴 유체의 동점성 계수

$\delta$  : 개구폭(균열폭)

$R$  : 침투반경(20 cm)

$r_0$  : 주입공의 반경(2 cm)

$Q$  : 주입량

상기 균열폭과 주입량의 추세 곡선으로부터 도출된  $Q=0.40916+0.0403$  식을 적용하여, 현장 여건에 맞는 간략식을 정리하면 다음 (3)식과 같다.

$$P = \frac{6\nu(0.4091\delta+0.0403)0.5Rd}{0.01\pi\delta} \ln \frac{R}{r_0} \quad (3)$$

여기서,  $P$  : 주입압력( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )

$\nu$  : 동점성 계수

$\delta$  : 균열폭

$R$  : 침투반경(20 cm)

$r_0$  : 주입공의 반경(2 cm)

$d$  : 구조물의 두께

상기 (3)식은 암반 균열 부에 주입되는 식으로서, 암반의 균열(절리)은 연속성이 있으나, 구조물의 균열은 진행 상태에 따라 균열 깊이가 제한이 되어 있으므로, 주입량에 따른 주입압력을 변형하여 적용하였다. 아래 도표 4에서 주입압력을 계산한 결과 1.410~7.753  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이었고, 평균 주입압력은 2.766  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 으로 실제 적정 주입압력보다 낮게 계산되었으며, 균열폭이 클수록 주입압력이 작아지는 결과가 나타났다. 그러나 계산상의 평균 주입압력보다 실제 적정 주입압력은 3.0~3.5  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 에서 가장 주입이 잘되는 것으로 나타났기 때문에, 상기 (3)식은 참고용으로 사용하고, 주입압력이 주입량에 영향을 미치는 인자이긴 하지만 주입량에 절대적 변수가 되지 못하는 것으로 나타났다.

### 3.3 균열폭, 주입시간, 주입압력과의 관계

균열폭과 주입시간의 관계, 균열폭과 주입압력과의 관계를 파악하기 위해서 품질관리 기법중의 하나인 산포도를 이용하여 분석하였다. 분석 결과 그림 4에서와 같이 균열폭과 주입시간, 주입압력은 상관 관계가 없는 무상관 관계로 나타났다. 그러나 그림 4의 주입압력과 주입시간 관계에서는 주입압이 증가함에 따라 주입시간은 감소를 하고, 주입압이 감소함에 따라 주입시간이 증가하는 관계를 갖고 있다. 이렇게 균열폭에 대한 주입압력과 주입시간은 밀접한 상관 관계를 가지고 있으며, 주입압력 또한 주입량에 영향을 미치는 요인이다. 저압 주입시에는 주입시간이 길어지며 균열내부까지 주입이 수월하여 주입량도 증가하고, 고압 주입시에는 초기 주입량은 많으나 전체적으로 주입량이 줄어들어 부분적인 공극이 나타날 수 있다. 그러나 주입압력에 따른 균열부위의 주

도표 4. 간략식을 이용한 균열폭에 대한 주입량과 주입압력의 비교표

균열폭 (mm)	구분	주입량 (kg/ea)	주입압력 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	비고
0.1		0.0162	7.753	
0.2		0.0244	4.229	
0.3		0.0326	3.024	
0.4		0.0407	2.467	
0.5		0.0489	2.115	
0.6		0.0571	1.880	
0.7		0.0653	1.712	
0.8		0.0735	1.586	
0.9		0.0816	1.488	
1.0		0.0898	1.410	

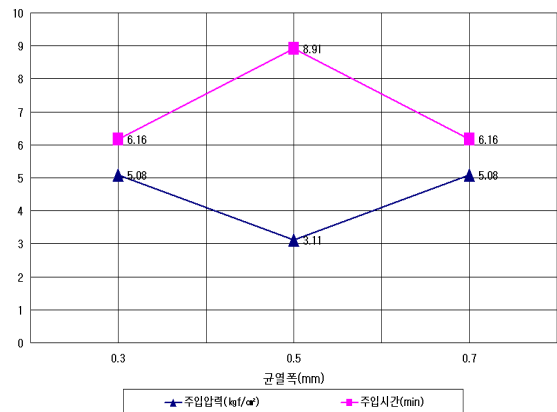


그림 4. 균열폭에 대한 주입시간, 주입압력의 관계

입에 있어, 균열폭에 알맞은 주입제(에폭시 수지)의 선정은 점성도에 관계가 있으므로, 각 현장에서는 해당 균열에 알맞은 점성을 가지며 주입압력이 3.0~3.5  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 에서 저압 주입시 가장 주입이 잘되는 주입제를 선택하여 사용하도록 한다. 본 조사 대상 구조물 보수에 사용된 에폭시 수지의 배합비는 주제와 경화제의 비율이 2:1이며, 에폭시 수지의 점성도는 5000(CPS)이하의 주입제를 사용하였다. 실제 주입은 주입압력이 3.11~5.08  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 을 넘지 않는 범위 내에서 시공관리가

이루어져야 하며, 최적 주입은 3.0~3.5 kgf/cm<sup>2</sup>의 저압 주입으로 나타났으며, 단위 m 당 주입시간은 8분 주입이 가장 이상적이고, 개소 당 주입시간은 1분 36초 이상이 가장 적절한 것으로 나타났다.

### 3.4 구조물별 균열에 따른 주입량과의 관계

구조물별 균열 위치에 따른 주입량의 관계는 도표 5와 그림 5에서와 같이 박스의 천장 및 벽체의 균열에 따른 주입량의 차이는 미소한 것으로 나타났으며, 터널 라이닝의 천장 및 벽체의 균열 폭에 따른 주입량의 차이는 0.3 mm에서는 박스의 경우에서와 같이 미소한 차이만이 발생하였

도표 5. 구조물별 균열 위치에 따른 주입량 비교표

균열폭 (mm)	박스의 주입량 (kg/m)		터널 라이닝의 주입량(kg/m)		비고
	천장	벽체	천장	벽체	
0.3	0.179	0.185	0.120	0.112	
0.5	0.250	0.247	-	0.288	
0.7	0.300	0.308	-	0.327	

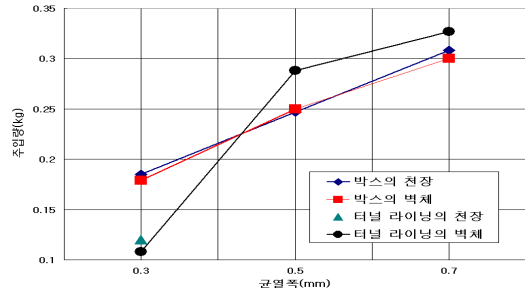


그림 5. 구조물별 균열 위치에 따른 주입량과의 관계

고, 0.5 및 0.7 mm의 균열은 터널 라이닝 천장에 없는 관계로 비교를 하지 못하였다. 전반적인 결과는 구조물의 균열 위치와 주입의 방향에 따른 주입량의 변화는 미소하였고, 주입량은 균열의 폭에 따라 증가하는 경로 나타났다. 또한 구조물 규모에 따라 주입량의 관계를 박스 구조물과 터널 라이닝 구조물 벽체에서 살펴볼 때 균열폭 0.3 mm에서는 박스 구조물보다 터널 라이닝 구조물의 주입량이 작으며, 0.5 mm 및 0.7 mm에서는 터널 라이닝 구조물에서 주입량이 커지는 경향을 띠고 있다. 이런 주된 이유는 터널 라이닝의 경우 구조물 두께가 작고, 균열의 깊이가 방수층까지 연결되어서 이러한 현상이 발생되었을 경우로 판단된다. 박스 구조물의 경우에는 구조물의 크기에 따라 다소 주입량 증감에 영향을 미치겠지만, 주입량의 주된 증가의 원인은 균열폭의 증가에 따라 증가하고 있는 것으로 나타났다.

### 3.5 균열폭 및 구조물 두께와 주입시간과의 관계

도표 6. 균열폭 및 구조물 두께와 주입시간 비교표

구조물 두께별 균열폭 (mm)	터널 라이닝	박스				
	20	40	40~60	60~80	80이상	
0.1~0.2	1min 10sec/m	1min 00sec/m	1min 20sec/m	1min 50sec/m	2min 00sec/m	
0.3~0.4	2min 20sec/m	2min 10sec/m	2min 30sec/m	3min 30sec/m	4min 00sec/m	
0.5~0.6	3min 30sec/m	2min 50sec/m	3min 50sec/m	5min 20sec/m	6min 00sec/m	
0.7~0.9	5min 15sec/m	3min 30sec/m	4min 30sec/m	6min 10sec/m	7min 00sec/m	
1.0이상	5min 50sec/m	5min 10sec/m	6min 20sec/m	8min 50sec/m	10min 00sec/m	

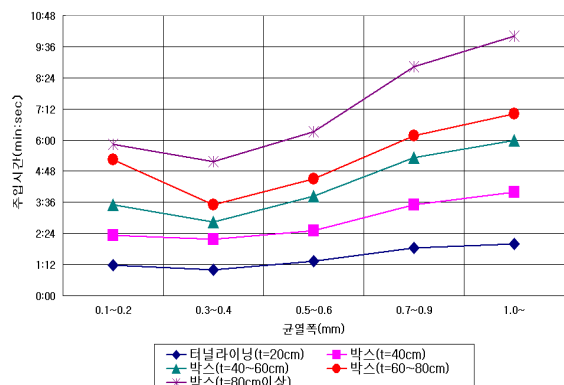


그림 6. 균열폭 및 구조물 두께와 주입시간과의 관계

다음은 3.0~3.5 kgf/cm<sup>2</sup>의 일정한 저압 주입으로 균열폭 및 구조물 두께에 따라 실측한 주입시간을 상기 도표 6과 그림 6에 나타내 보였다. 전반적인 주입시간의 경향은 구조물 종류에 상관없이 구조물

두께 및 구조물 균열폭의 증가에 따라 주입시간이 증가하는 경로 나타났다. 그러나 균열폭 0.1~0.2 mm에서는 구조물 두께에 따라 다소의 차이는 있으나, 0.1~0.2 mm와 0.3~0.4 mm에서 주입시간의 경향은 감소 추세를 나타냈다. 이러한 주된 원인은 미세 균열인 0.1~0.2 mm에서의 균열폭이 작아 주입하는 소요시간이 0.3~0.4 mm의 균열폭보다 증가하는 경로 보이며, 구조적 문제가 없는 미세 균열에서는 보수가 불필요함을 나타내 보이며, 또한 에폭시수지 주입공법에서 수지의 점성도에 따라 다르지만 균열폭 0.3 mm 전후에서 적절한 주입을 할 수 있음을 결과에서 보여주고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 보수에 대한 품질상태를 검사할 수 있는 기준 설정이 없는 상태에서, 구조물 보수 공사가 필요한 지하철 3, 4호선 터널 라이닝 및 박스 구조물을 선정하여, 균열폭에 대한 주입량, 균열폭에 대한 주입시간, 균열폭에 대한 주입압력, 주입압력과 주입시간, 구조물 규모에 따른 주입량, 구조물별 균열 위치에 따른 주입량, 균열폭 및 구조물 두께와 주입시간의 관계에 관하여, 현장 조사와 자료 분석을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 주입관리에 있어서 가능한 주입압력을 낮게 하고 주입시간을 충분하게 줘 주입함으로써, 주입관리의 품질을 확보할 수 있다.
- (2) 주입시간이 많을수록 주입량이 증가하고, 경제적인 주입과 시설물의 완전한 밀착 주입을 위하여 단위 m당 8분 주입이 가장 이상적이고, 개소 당 1분 36초 이상의 주입이 주입량을 만족할 수 있는 것으로 조사되었으므로, 매 주입구마다 2분 이상의 주입시간으로 주입하도록 한다.
- (3) 실제 주입에서는 주입압력이 3.11~5.08 kgf/cm<sup>2</sup>을 넘지 않는 범위 내에서 시공관리가 이뤄져야 하고, 적정 주입압력은 균열폭과 깊이를 고려하여 3.0~3.5 kgf/cm<sup>2</sup>로 저압 주입시 최적의 주입이 되었다.
- (4) W.J. Baker의 주입압력과 주입량의 관계식을 응용하여 추정식을 정립하였으나, 구조물에서는 균열의 깊이가 제한되기 때문에 추정식은 참고용으로 이용하며, 주입압력이 주입량의 절대적 요인이 되지는 못하였다.
- (5) 구조물 종류에 따른 주입량의 다소의 차이는 있으나, 주입량의 주된 증감은 균열폭의 크고 작음에 따라 증감이 되는 경로 나타났다.
- (6) 구조물의 균열 위치와 주입의 방향에 따른 주입량의 변화는 미소하였다.
- (7) 구조물의 종류에 상관없이 전반적인 주입시간은 구조물 두께 및 균열폭의 증가에 따라 증가하였고, 에폭시수지 주입공법에서는 균열폭이 0.3 mm 전후에서 적절한 주입을 할 수 있었다.

#### 참고문헌

1. 김진근 (1994), “콘크리트 균열의 원인”, 학회지, 제6권4호, 한국콘크리트학회
2. 최완철 (1994), “콘크리트 구조물의 균열체계에 따른 균열제어와 대책”, 학회지, 제6권4호, 한국콘크리트학회
3. 변근주의 (2000), “콘크리트 구조물의 균열 평가 기법과 보수보강”, 학회지, 제12권6호, 한국콘크리트학회
4. (사)한국콘크리트학회 (2003), “콘크리트표준시방서”, 기문당
5. (사)한국콘크리트학회 (2003), “콘크리트구조설계기준”, 기문당
6. 천병식 (1997), “건설기술자를 위한 지반주입공법”, 원기술